

УДК 536.2+532.5+537.84

СОУДАРЕНИЕ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭТОЙ ЖЕ ЖИДКОСТИ

В. Г. Баштовой, П. Г. Кужир, А. Г. Рекс

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

1. Введение

Удар капли о поверхность жидкости — классическая задача механики жидкости, подробно описанная в обзоре [1]. Данная проблема для электропроводной капли и поверхности электропроводной жидкости рассмотрена в [2], а для магнитной капли и поверхности немагнитной жидкости — в [3]. В данной работе изучается соударение капли магнитной жидкости с поверхностью этой же магнитной жидкости в однородном магнитном поле. Исследуются фазы соударения и распространение волн на поверхности жидкости-мишени. Особенности данных процессов в магнитном поле связаны с деформацией падающей капли и влиянием поля на процессы, происходящие на поверхности жидкости-мишени.

Падающая капля магнитной жидкости — это источник возмущения поверхности жидкости-мишени. Этот источник не является ни точечным, ни мгновенным. Капля вытягивается вдоль магнитного поля, и, вследствие зависимости формы капли от величины поля, начальные условия процесса соударения и распространения волн будут разными. В нормальном к поверхности жидкости-мишени поле капля входит своей заостренной частью в жидкость, в тангенциальном поле — ударяется своей длинной стороной о поверхность жидкости.

Поверхность магнитной жидкости в нормальном магнитном поле, при некоторых его значениях, становится неустойчивой к малым возмущениям, и на ней развивается гексагональная структура пиков. Соударение капли с неплоской возмущенной поверхностью в данной ра-

боте не рассматривается. В случае плоской поверхности толщина слоя магнитной жидкости-мишени влияет на процессы самого удара и распространения волн на поверхности. Здесь рассмотрены две предельных ситуации: толстый слой жидкости, то есть ситуация, в которой дно сосуда не влияет на данные процессы, и тонкий слой, когда имеет место сильное взаимодействие дна с поверхностными волнами и удаляющейся каплей.

2. Методика эксперимента

Экспериментальная установка показана на рис. 1. Магнитная жидкость-мишень заливается в круглую кювету диаметром 150 мм; глубина слоя составляет 18 мм (толстый слой) и 1 мм (тонкий слой). Формируемые в пипетке капли объемом $5 \pm 1 \text{ мм}^3$ падают с высоты 260 мм в жидкость-мишень.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Однородное магнитное поле напряженностью до 20 кА/м, нормальное либо тангенциальное к поверхности жидкости-мишени, создается при помощи катушек Гельмгольца.

Магнитная жидкость на основе магнетита и керосина имеет следующие свойства: плотность $\rho = 1270 \text{ кг/м}^3$, поверхностное натяжение $\sigma = 0,029 \text{ Н/м}$, динамическую вязкость $\eta = 5,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, намагниченность насыщения $M_s = 38,2 \text{ кА/м}$. В исследуемом диапазоне полей принимается линейный закон намагничивания жидкости с магнитной

проницаемостью $\mu = 2,5$. При определении напряженности поля в магнитной жидкости-мишени учитываются факторы размагничивания цилиндрического объема жидкости в кювете.

Процесс соударения фиксируется в трех проекциях с помощью видеокамер Panasonic S-VHS-C NV-S88 со скоростью 50 кадр/с и выдержкой 0,002 с. Освещение производится с помощью фокусируемых осветителей мощностью 250 Вт. По отснятому материалу анализируется геометрия разбрызгивания на толстом слое, а также распространение поверхностных волн на толстом и тонком слоях.

3. Результаты

3.1. Фазы соударения

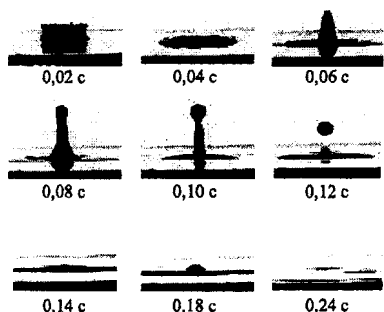
На рис. 2 представлена последовательность стадий соударения на толстом слое. В отсутствие магнитного поля процесс соударения протекает так же, как и для немагнитной жидкости. Наблюдаются две стадии: корона и струйка Релея. Струйка имеет форму пешки (рис. 2а). При движении струйки вниз ее головка отделяется, образуя сферическую каплю. После затухания первой струйки следует вторая с гораздо меньшей высотой.

В нормальном поле конфигурация короны существенно не меняется (рис. 2б). По мере возрастания напряженности поля форма струйки меняется от пешки к заостренному пику. Капля не отделяется в полях, больших 1,8 кА/м. В полях, близких к пороговому значению 7 кА/м, при котором возникает неустойчивость поверхности магнитной жидкости, динамика струйки имеет колебательную природу. В полях 0–5,8 кА/м затухание струйки сопровождается одним колебанием (вторичная струйка), а в полях 6,3–7,0 кА/м 5–7 колебаниями. Зависимость высоты струйки от времени в поле 6,5 кА/м представлена на рис. 3 и хорошо аппроксимируется экспоненциальным законом затухания.

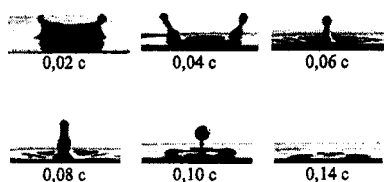
В тангенциальном поле имеет место выбрасывание струек из короны в боковые стороны, то есть разбрызгивание происходит не по всем направлениям, а только в плоскости, перпендикулярной направлению поля (рис. 2в, г). Угол между выбрасываемыми боковыми струйками варьируется в пределах 90–120°. Центральная струйка сплющи-

вается и прижимается к поверхности жидкости, вторичной струйки не наблюдается. От всех трех струек отделяются маленькие капли, капля центральной струйки имеет форму эллипсоида, вытянутого вдоль поля.

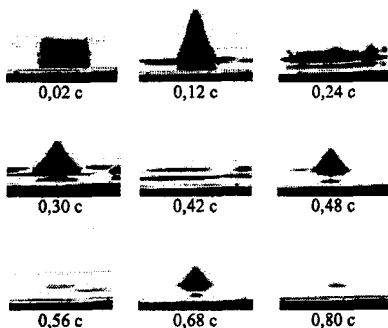
а) Поле отсутствует



в) Тангенциальное поле (перпендикулярно плоскости кадров) $H = 6 \text{ кА/м}$



б) Нормальное поле $H = 6 \text{ кА/м}$



г) Тангенциальное поле (параллельно плоскости кадров) $H = 6 \text{ кА/м}$

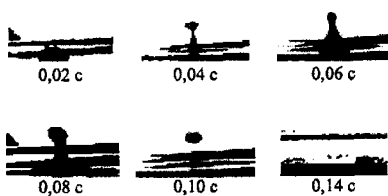


Рис. 2. Последовательность стадий соударения

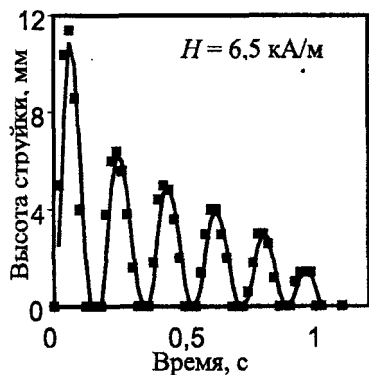


Рис. 3. Затухание колебаний струйки Релея в нормальном магнитном поле

Зависимости высоты выброса струйки Релея (максимальной высоты первичной струйки) и длительности процесса соударения от магнитного поля представлены на рис. 4, 5.

Нормальное поле развивает возмущения поверхности магнитной жидкости, и длительность соударения, включая стадии колебания струйки, сильно возрастает. При этом амплитуда колебаний остается приблизительно постоянной. Тангенциальное поле подавляет возмущения, высота выброса струйки и длительность соударения снижаются. Пунктирные линии означают порог неустойчивости поверхности магнитной жидкости в нормальном поле.

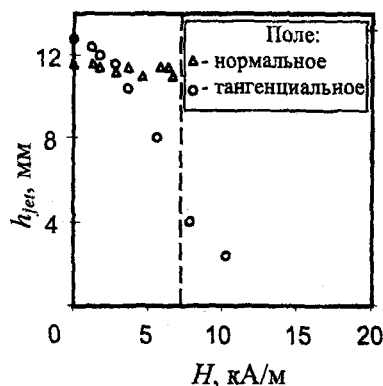


Рис. 4. Зависимость высоты выброса струйки Релея от напряженности поля

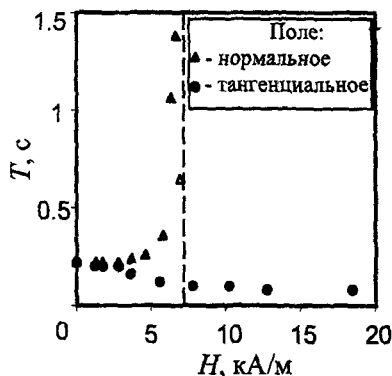


Рис. 5. Зависимость длительности соударения от напряженности поля

2.2: Волны

Падающая капля инициирует распространение волн на поверхности жидкости-мишени. Для случая толстого слоя измерены количественные характеристики волн. По видеоматериалу частота волн определяется как частота возникновения блика в центральной точке. Блик соответствует возвышению поверхности. Наблюдение ведется за передним фронтом волны, и измеряется его скорость. Для случая тонкого слоя дается качественное описание процесса распространения волн.

Рассмотрим распространение волн на толстом слое (рис. 6а). В нормальном поле, как и в отсутствие поля, наблюдаются круговые волны. В околоритических полях (6,3–7,0 кА/м) картина волн искажается возмущениями в виде возвышений и впадин, расположенных с определенной периодичностью на гребнях бегущих круговых волн. В тангенциальном поле фронт волны имеет овальную форму, близкую к эллипсу, вытянутому вдоль направления поля.

В случае мелкого слоя жидкости-мишени сказывается взаимодействие падающей капли и дна кюветы, волновая картина сильно искажается, принимая замысловатый вид (рис. 6б). С увеличением как нормального, так и тангенциального поля волновая картина постепенно упорядочивается, так, что в нормальном поле более 3 кА/м и в тангенциальном поле более 9 кА/м распространяются соответственно круговые и овальные волны, как и в случае глубокого слоя. В околоритических нормальных полях возмущений на гребнях волн не наблюдается. Неустойчивость поверхности магнитной жидкости-мишени наступает в нормальном поле 7,5 кА/м.

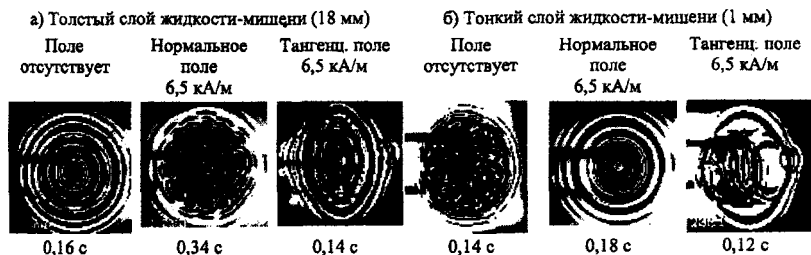


Рис. 6. Волны на поверхности магнитной жидкости

Количественное сопоставление результатов эксперимента по распространению волн на толстом слое с теорией будем проводить на основе линейного анализа, применяя известное дисперсионное соотношение для волн на поверхности магнитной жидкости [4]:

$$\rho\omega^2 = \sigma k^3 + \rho g k - (\mu_0 M_n^2)/(1 + 1/\mu) \cdot k^2 + (\mu_0 M_\tau^2)/(1 + \mu) \cdot \cos^2 \phi \cdot k^2, \quad (1)$$

где ω , k , k — соответственно угловая частота, волновой вектор и волновое число, M_n , M_τ — нормальная и тангенциальная компоненты намагниченности жидкости (определяются с учетом размагничивающего поля кюветы), ϕ — угол между тангенциальной компонентой магнитного поля и направлением распространения волн, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнитная постоянная вакуума.

В эксперименте соотношение сил тяжести и сил поверхностного натяжения $Bo = (\rho g)/(\sigma k^2)$ не превышает 0,05, поэтому в дальнейшем сила тяжести не учитывается, а волны считаются капиллярными. Соотношение (1) принимает следующий безразмерный вид:

$$1 = K^3 - S_n K^2 + S_\tau \cos^2(\phi) K^2, \quad (2)$$

где $K = k/k_0$ — безразмерное волновое число, $k_0 = (\rho\omega^2/\sigma)^{1/3}$ — волновое число в отсутствие поля, параметры $S_n = \mu_0 M_n^2 / [(1 + 1/\mu)(\rho\omega^2\sigma^2)^{1/3}]$ и $S_\tau = \mu_0 M_\tau^2 / [(1 + \mu)(\rho\omega^2\sigma^2)^{1/3}]$ имеют физический смысл отношения магнитных сил к капиллярным.

Фазовая скорость волн определяется как $v = \omega/k$ (размерная) или $V = 1/K$ (безразмерная, масштаб скорости $v_0 = \omega/k_0$). Частота ω волн принимается постоянной во времени и не зависящей от поля. Результаты вычисления безразмерных скоростей волн из уравнения (2) представлены на рис. 7 (линии). Экспериментальные точки ($\omega = 130 \text{ с}^{-1}$) хорошо соответствуют теории. Скорость волн убывает в нормальном поле, в тангенциальном поле она возрастает в направлении поля и остается неизменной в поперечном направлении, что обуславливает овальную форму волны.

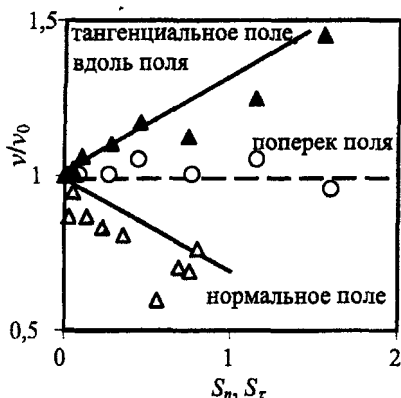


Рис. 7. Зависимость безразмерной скорости волн от магнитного поля (кривые — теория, точки — эксперимент)

В случае слабых и сильных полей имеют место асимптотики:

$$V = \begin{cases} 1 + S_\tau / 3, & S_\tau \ll 1, \\ S_\tau^{1/2}, & S_\tau \gg 1 \\ 1 - S_n / 3, & S_n \ll 1, S_\tau = 0. \end{cases} \quad S_n = 0, \quad (3)$$

В заключении отметим, что область изменения параметра S_n ограничена сверху критическим значением $S_{\text{crit}} = 2(\rho g^3 / (\sigma \omega^4))^{1/6}$, равным в нашем случае 1,4, при котором возникает неустойчивость поверхности жидкости-мишени.

Заключение

1. В магнитном поле, нормальном к поверхности, разбрызгивание происходит в виде колеблющейся струйки, а в тангенциальном поле — в направлении, поперечном к полю.

2. В нормальном магнитном поле распространяются круговые волны; с возрастанием поля их скорость снижается. В тангенциальном поле распространяются волны овальной формы; их скорость возрастает в направлении поля и остается постоянной в поперечном направлении.

Авторы признательны Венецианскому офису ЮНЕСКО (UVO-ROSTE) за поддержку данной работы.

Литература

1. A. Prosperetti, H. N. Oguz, Annu. Rev. Fluid Mech. 25 (1993).— P. 577.
2. М. З. Каудзе, О. А. Лиелаусис, МГ 1 (1984).— С. 37.
3. С. Судо, М. Ямамбе, Х. Хашимото, К. Катагири, МГ 32 (1996).— С. 494.
4. Magnetic fluids and applications handbook / B. Berkovski, V. Bashtovoi.— Begell house, inc.— New York, 1996.— P. 832.